

К ВОПРОСУ О ПРЕДСТАВЛЕНИИ РОТОРА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Пятлина Н.Г., Невенгловский А.В.

Донецкий национальный технический университет

E-mail: lam@elf.dgtu.donetsk.ua

The paper is dealt with the problem of transforming the complex equivalent electrical circuits of the solid constructional elements of the turbogenerator rotor into the simplest form attributed to the second order differential equations. The paper presents some results which illustrate the authors' conception. Attention is drawn to the necessity of taking account of the saturation effect in the turbogenerator stator and rotor leakage fluxes when analyzing the faults in electrical system connected with the damage of apparatuses and erroneous action of the relay protection.

Расчёты переходных процессов в электрических системах традиционно разделяют на расчёты электромагнитных процессов, характер протекания которых зависит от величин токов в статорных обмотках турбогенераторов, и расчёта электромеханических переходных процессов, требующие учёта управляющих воздействий со стороны турбины и системы возбуждения машины. В первом случае расчёты ограничиваются, как правило, определением значений тока к моменту наступления его ударной величины или отключения повреждения, во втором – оценкой изменения кинетической энергии ротора, определяемой его угловым положением относительно синхронно вращающихся осей. Очевидно, что для анализа правильности работы устройств релейной защиты необходим как учёт затухания составляющих тока переходного процесса, так и изменения углового положения векторов ЭДС турбогенераторов. Поскольку в настоящее время значительное количество высоковольтных коммутационных аппаратов в Донбасской электрической системе в предельных условиях по отключающей способности, возникает также необходимость повышения точности расчёта величин токов короткого замыкания.

Расчёты переходных процессов в электрических системах для решения указанных выше задач предъявляют определённые требования по точности исходной информации (параметров элементов электрической системы) и, в частности, обоснования её минимального объёма. Очевидно, что использование справочных данных об электромагнитных параметрах турбогенераторов в рассматриваемой постановке задачи является недостаточным. Экспериментальные параметры схем замещения массивного ротора современных крупных турбогенераторов, синтезированных по переходным функциям, анализировались в работе [1]. При этом отмечалось отсутствие общности в характере изменения зависимостей комплексных коэффициентов несимметрии, отражающих отношение АФЧХ сопротивлений массивного ротора по осям его симметрии в функции скольжения ротора. Известно также, что использование многоконтурных схем замещения ротора для анализа переходных процессов обеспечивает достаточно высокий уровень точности при расчёте изменения тока статора, но не исключает существенных погрешностей при определении тока в обмотке возбуждения.

Указанные выше несоответствия объясняются тем, что повышение уровня точности при расчёте токораспределения ротора может быть достигнуто только при условии обеспечения достоверности значений, используемых в процессе проведения синтеза схемы замещения [2,3] параметров обмоток статора, возбуждения и учёте взаимной индукции между обмоткой возбуждения и контурами демпферной системы по путям рассеяния их магнитных потоков, а также учёте влияния насыщения по путям рассеяния обмоток статора и ротора.

Вопросы ограничения объёма исходной информации в форме параметров схем замещения турбогенераторов и её обобщения рассматривались в работах [5-8]. В частности, в [7] массивные элементы конструкции ротора представлялись четырьмя контурами по каждой из осей симметрии ротора. В зарубежной практике ещё в конце 80-х годов массивы роторов турбогенераторов рекомендовалось учитывать двумя контурами по оси d и тремя по оси q.

Настоящая работа ставит своей целью: предложить рекомендации по выбору наиболее целесообразного подхода к решению задачи эквивалентирования многоконтурной схемы замещения, полученной по данным опыта затухания постоянного тока и четырёхконтурной схемы замещения ротора обобщенного турбогенератора; проиллюстрировать методику и необходимость применения известного метода [4] учёта влияния насыщения по путям потоков рассеяния турбогенератора при расчётах коротких замыканий с использованием ненасыщенных значений параметров массива ротора.

Ниже, на примере турбогенератора ТГВ-300, рассматривается задача эквивалентирования многоконтурных схем замещения по продольной и поперечной осям ротора двумя контурами. Переходная функция проводимости демпферной системы определялась по выражению

$$Y_{D(q)}(t) = Ca^{-1} \left[Y_{D(q)}(p) = \sum_{k=1}^{9(8)} \frac{p}{\Gamma_{d(q)k} + pX_{d(q)\sigma k}} \right], \quad (1)$$

где $\Gamma_{d(q)k}$, $X_{d(q)\sigma k}$ – активное и индуктивное сопротивление k-того контура по осям d и q соответственно.

При эквивалентировании переходной функции проводимости массива $Y_{D(Q)}(t)$ суммой двух экспоненциальных составляющих

$$Y_{D(Q)}(t) = \sum_{k=1}^2 Y_{d(q)k} \cdot \exp(-\alpha_{d(q)k} t) \quad (2)$$

с использованием программы аппроксимации, реализующей минимум среднеквадратичного отклонения эквивалента от оригинала (рис. 1), получены следующие значения параметров экспонент

$$\begin{array}{ll} Y_{d1} = 19,794 & \alpha_{d1} = 2,4245 \\ Y_{d2} = 6,972 & \alpha_{d2} = 0,0742 \end{array} \qquad \begin{array}{ll} Y_{q1} = 20,436 & \alpha_{q1} = 1,837 \\ Y_{q2} = 3,761 & \alpha_{q2} = 0,0495 \end{array}$$

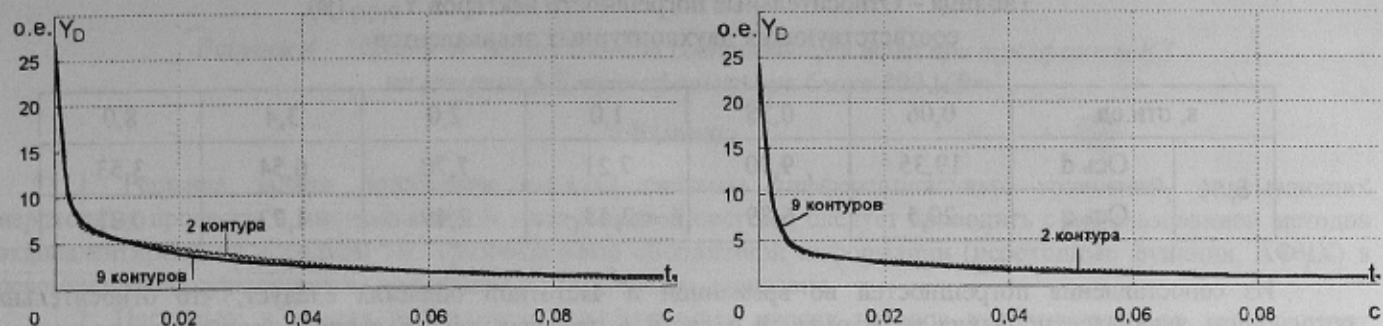


Рисунок 1 – Эквивалентирование переходных функций $Y_{D(Q)}(t)$ массива ротора турбогенератора ТГВ-300

Изменение относительной погрешности аппроксимации в отдельных временных диапазонах показано на рис. 2.

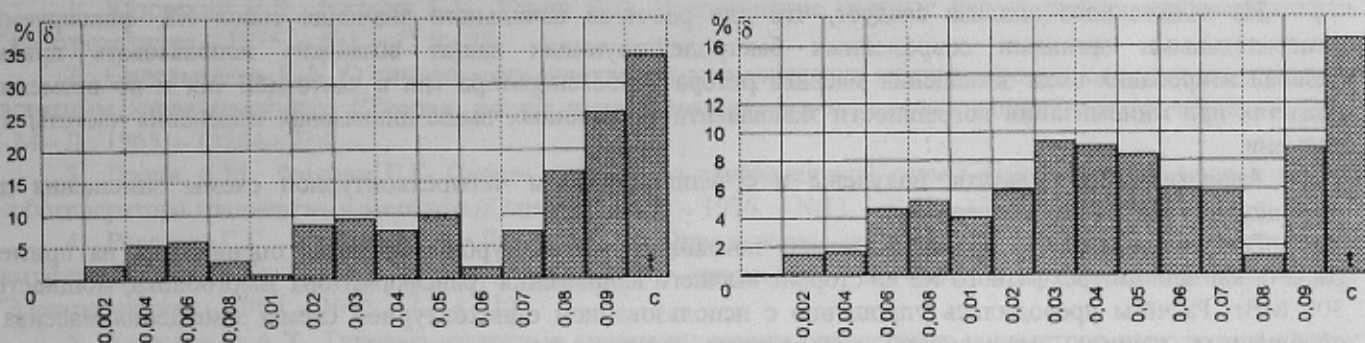


Рисунок 2 – Изменение относительной погрешности аппроксимации переходных функций $Y_{D(Q)}(t)$ двумя экспоненциальными составляющими

Параметры эквивалентных схем замещения, соответствующих эквивалентным переходным функциям $Y_{D(Q)}(t)$, определялись по выражению

$$Y_{D(Q)z}(p) = \sum_{k=1}^2 \frac{p}{\Gamma_{d(q)k} + pX_{d(q)\sigma k}} = Ca [Y_{D(Q)z}(t)] \quad (3)$$

где

$$\begin{array}{ll} X_{d\sigma 1z} = 0,05052 & X_{d\sigma 2z} = 0,14343 \\ \Gamma_{d\sigma 1z} = 0,12249 & \Gamma_{d\sigma 2z} = 0,01064 \\ X_{q\sigma 1z} = 0,04893 & X_{q\sigma 2z} = 0,26589 \\ \Gamma_{q\sigma 1z} = 0,08987 & \Gamma_{q\sigma 2z} = 0,01317 \end{array}$$

АФЧХ проводимости ротора турбогенератора для исходных девяти (восьми) - и эквивалентных двухконтурных схем замещения показаны на рис.3, а значения относительных погрешностей эквивалентов приведены в таблице.

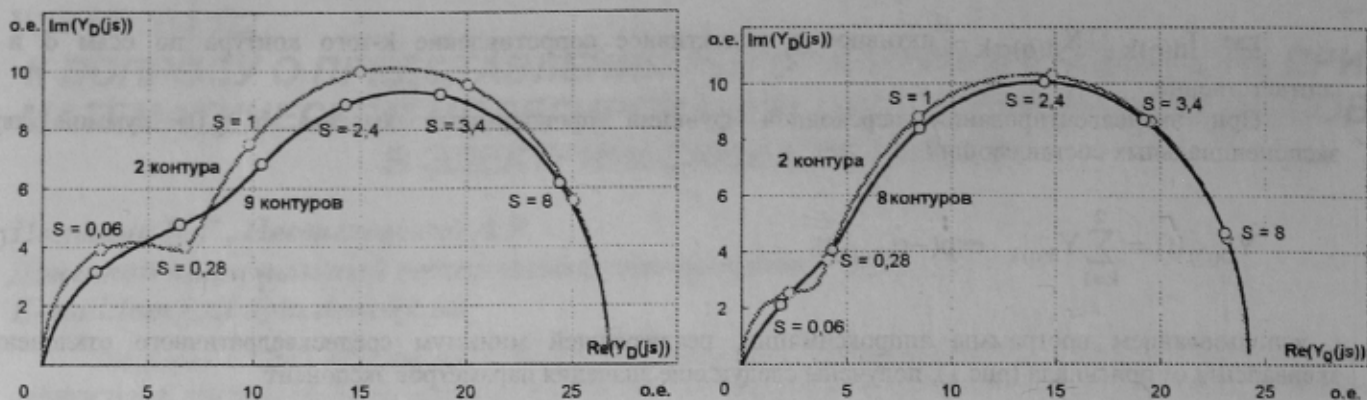


Рисунок 3 – АФЧХ проводимости массива ротора турбогенератора ТГВ-300

Таблица – Относительные погрешности векторов $Y_{D(Q)\Sigma}(j\omega)$, соответствующих двухконтурных эквивалентов

s, отн.ед.		0,06	0,28	1,0	2,0	3,4	8,0
$\delta, \%$	Ось d	19,35	9,90	7,21	7,70	6,54	3,53
	Ось q	20,5	6,89	3,49	2,49	1,72	0,81

Из сопоставления погрешностей во временной и частотной областях следует, что относительная погрешность эквивалентирования во временной области в пределах одного периода (соответствует времени срабатывания современных релейных защит на микропроцессорной базе) и в частотной области в диапазоне $2 - \infty$ отн.ед. не превышает 10 %. Отмеченная особенность, несмотря на отсутствие детерминированного соответствия в выражении интеграла Фурье между временными и частотными переменными, даёт возможность оценивать соответствие между отдельными временными и частотными диапазонами по равенству относительной погрешности эквивалентирования.

Из изложенного анализа следует, что для расчётов начального значения токов КЗ, фиксируемых измерительными органами современных быстродействующих защит возможно использовать приёмы эквивалентирования схем замещения массива ротора турбогенератора как в частотной так и во временной областях при минимизации погрешности эквивалента в указанных выше диапазонах изменения частоты или времени.

Аналогичные результаты получены и с использованием четырёхконтурной схемы замещения для обобщённого ротора турбогенератора.

Влияние насыщения путей магнитных потоков рассеяния турбогенераторов оценивалась на примере расчёта внезапного трёхфазного КЗ на стороне высшего напряжения трансформатора энергоблока, мощностью 300 МВт. Расчёты проводились упрощённо с использованием одноконтурной схемы замещения массива и обобщённых данных, отражающих усреднённые зависимости изменения индуктивного сопротивления рассеяния статора и массива ротора от продольной составляющей тока статора [4]. Сопротивление взаимной индукции между контурами на роторе в рассматриваемом примере не учитывалось. Расчёт проводился по известному аналитическому выражению [9]

$$I_{dn}(t) = \frac{E_{q0}}{x_d} + \frac{U_{q0}}{x_d} \cdot \frac{(T'_{d0} - T'_d)(T'_d - T''_{d0})}{T'_d(T'_d - T''_d)} e^{-t/T'_d} + \frac{U_{q0}}{x_d} \cdot \frac{(T'_{d0} - T'_d)(T''_{d0} - T''_d)}{T''_d(T'_d - T''_d)} e^{-t/T''_d}, \quad (4)$$

где используемые при расчётах x_d и постоянных времени значения индуктивного сопротивления рассеяния статора и параметры демпферного контура рассчитывались в зависимости от I_{dn} следующим образом

$$x_{\sigma}(I_{dn}) = x_{\sigma \text{ ненас}} - 0,03(1 - \exp(-0,57 \cdot I_{dn})); \quad (5)$$

$$r_D(I_{dn}) = r_{D \text{ ненас}}(1 - 0,16(I_{dn} - 1)); \quad (6)$$

$$x_{\sigma D}(I_{dn}) = x_{\sigma D \text{ ненас}}[\exp(-0,75(I_{dn} - 1))] \quad (7)$$

Результаты расчёта приведены на рис.4. различие между начальными значениями продольной составляющей тока статора с учётом и без учёта влияния насыщения составило 19%.

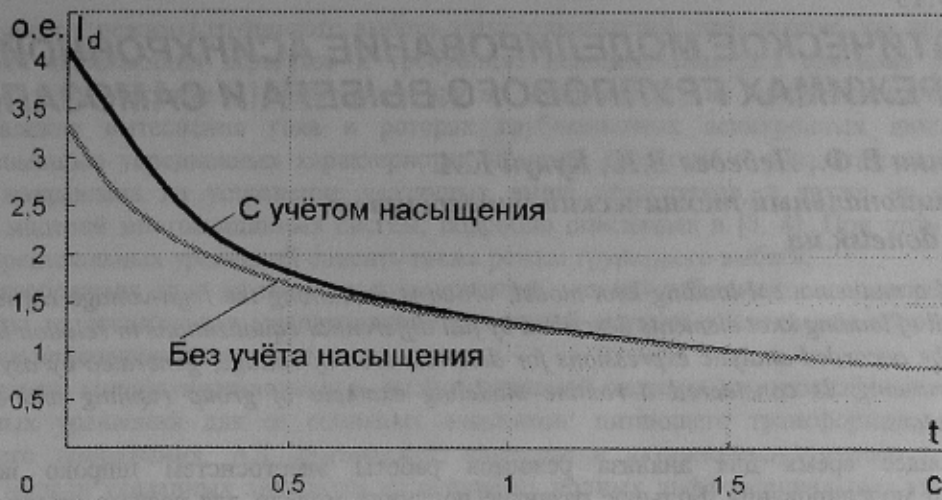


Рисунок 4 – Изменение периодической составляющей тока при трёхфазном КЗ на стороне ВН трансформатора блока 300 МВт

Выводы

1. Решение задачи понижения порядка системы дифференциальных уравнений, описывающих переходные процессы в многомашинной электрической системе, следует проводить с использованием методов эквивалентирования исходной экспериментальной обобщённой информации (переходные функции, АФЧХ) в рекомендуемом ограниченном временном или частотном диапазоне.

2. Поскольку исходная информация, описывающая массив роторов турбогенераторов соответствует условиям ненасыщенного магнитного состояния машины, то расчёты в задачах анализа аварийных ситуаций следует проводить при учёте влияния насыщения по путям магнитных потоков рассеяния цепей статора и ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Казовский Е.Я., Rogozin Г.Г., Горин В.Я. Исследование частных характеристик турбогенераторов //Электротехника.– 1975. – №1. – С. 9 - 13.
2. Сидельников В.А. О синтезе схем замещения электрических машин переменного тока по заданным частотным характеристикам //Теория, расчёт и исследование высокоиспользованных электрических машин. – М.- Л.: 1965. – С.204 - 214.
3. Ларин А.М., Rogozin Г.Г. Синтез параметров эквивалентной схемы замещения массивного ротора турбогенератора градиентным методом //Электричество.– 1976. – №11. – С.10 - 13.
4. Rogozin Г.Г., Ларин А.М., Ларина Н.И. Определение зависимости параметров эквивалентного демпферного контура ротора турбогенератора от начального значения тока короткого замыкания //Электротехника.– 1999. – №12. – С.14 - 17.
5. Калюжный А.Х. Типовые частотные характеристики и определение параметров контуров на роторе крупных турбогенераторов //Применение частотных методов в электроэнергетическом исследовании. -Труды СибНИИЭ.– 1972.– вып.21 – С. 118 - 131.
6. Лукашев Э.С., Калюжный А.Х., Гамм Б.З. Определение и использование в расчётах типовых характеристик и параметров демпферных контуров турбогенераторов //Электричество.– 1977.– №7. – С.27 - 32.
7. Rogozin Г.Г., Заболотный И.П. Параметры эквивалентных контуров схем замещения ротора обобщённого турбогенератора //Электротехника.– 1980. – №5. – С.5 - 10.
8. Сивокобыленко В.Ф., Меженкова М.А. Определение параметров эквивалентных схем замещения турбогенераторов для расчётов на математических моделях // Збірник наукових праць Дон ДТУ, Серія "Електротехніка і енергетика", Випуск 17. – Донецьк: 2000. – С. 38 - 41.
9. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. -М.: изд-во «Энергия», 1964. -704с.

Авторы выражают глубокую благодарность проф. Rogozinu Г.Г. за консультационную помощь при выполнении данной работы.